

## 6.1. Основные понятия и подходы к формированию адаптивного управления

Первые идеи и методы адаптации проявились в задачах автоматической оптимизации производительности промышленных установок и в задаче увеличения мощности двигателей внутреннего сгорания ещё в 30-е годы. Основное содержание принципа “автоматической оптимизации” заключалось в поиске и удержании системы на экстремуме ее *статической* характеристики. Отсюда и название класса систем с адаптацией в это время – “экстремальные системы”. Теория экстремальных регуляторов разрабатывалась в СССР уже в 40-х годах\*. Но первой, по-видимому, книгой по адаптивному управлению как *принципу автоматической оптимизации* управляемых систем, стала опубликованная в США в 1951 году книга Ч.С. Дрейпера и И.Т. Ли “Принципы автоматической оптимизации”, в которой были представлены результаты исследований коллектива специалистов лаборатории авиационной автоматики MIT. В 1960 году эта книга была переведена на русский язык и опубликована под редакцией чл.-корр. АН СССР Б.Н. Петрова. Сам термин “адаптация” (от лат. *adapto* — приспособляю) появился в теории управления позже, чем системы обладающие этой способностью\*\*. В 1961 году в США под редакцией Э. Мишкина (Eli Mishkin) и Л. Брауна (Ludwig Braun, Jr.) была издана первая книга, где появился этот термин: книга в оригинале называлась “Adaptive control systems”. Её перевод под редакцией Я.З. Цыпкина был опубликован в СССР в 1963 году с названием “Приспосабливающиеся автоматические системы”.

В 60-е годы в СССР был более распространен термин самонастраивающиеся системы. Этим термином обозначалась автоматическая система, осуществляющая поиск оптимального состояния и изменяющая режим работы системы или перестраивающая ее параметры (а иногда и структуру) в соответствии с найденным оптимальным состоянием. Воплощение накопленных идей в рамках этого определения в те годы первоначально нашло в упомянутых экстремальных системах с поиском экстремума статической характеристики объекта. Новые идеи, методы, структуры, накопившиеся в этот период, нашли отражение в монографиях ряда советских ученых, в числе которых следует

---

\* Казакевич В.В. Об экстремальном регулировании/ Канд. дисс., МВТУ, 1945.

\*\* Aseltine J.A., Mancini A.R., Sarture C.W. A Survey of Adaptive Control Systems // IRE Trans. of Automatic Control. December, 1958. P. 102-108. (Эта статья **СОДЕРЖИТ** обширный список работ по адаптивным системам, опубликованных к тому времени).

отметить Ивахненко А.Г., А.А. Красовского, В.И. , Б.Н. Петрова, В.Ю. Рутковского , В.В. Солодовникова.

В эти же годы началось становление *беспоисковых* методов самонастройки, без каких-либо поисковых воздействий (сигнальных или же параметрических) в контуре управления. Этот подкласс адаптивных систем позже получил наименование *аналитических* самонастраивающихся систем , где для настройки параметров регулятора при неконтролируемых изменениях параметров модели объекта управления и (или) внешних возмущений использовались методы беспойскового определения тех или иных характеристик (частотных, временных, параметров режимов работы системы) на основе измеряемых переменных на входе и выходе объекта. В целом начальный период становления теории адаптивного управления в 50 — 60-е годы характеризовался бурным процессом формирования физических идей структурного синтеза адаптивных систем, в основу которых полагался метод непосредственной компенсации влияния неконтролируемых возмущений (параметрических, сигнальных, функциональных). Эти процессы сопровождалась разработкой *математических методов* адаптации как на основе поисковых, так и беспойсковых способов определения необходимых параметров и характеристик системы управления.

В середине 60-х годов проф. Я.З. Цыпкиным (ИПУ (ИАТ) АН СССР, Москва) была выдвинута ключевая идея адаптации, объединяющая целый ряд внешне различных задач. Эта идея базировалась на осознании *универсальности*, во-первых, самой проблемы адаптивности, проявлявшей себя в условиях недостатка информации при решении задач теории управления, теории надежности, исследования операций, теории игр, теории статистических решений, идентификации и оценивания, теории конечных автоматов, обучения искусственных нейронных сетей и т.д.; во-вторых, в создании единого механизма — *алгоритма адаптации*, использующего доступную измерительную информацию о состоянии системы. В основу такого механизма Я.З. Цыпкин положил *вероятностные и детерминированные итеративные* вычисления. Книги его стали общепризнанными классическими трудами в теории управления и положили начало бурному развитию алгоритмической теории адаптивных систем во всем мире.

Последующее развитие методов и алгоритмов адаптивного управления – в 70 — 80-е годы как в СССР, так и за рубежом в той или иной степени основывалось на этих идеях, а также на тех физических принципах, которые сложились в

начальный период 50-х — 60-х годов.

Среди других ключевых идей, оказавших наибольшее влияние на развитие теории управления с адаптацией к неконтролируемым изменениям свойств объекта и внешним возмущениям в 70-е годы, по праву необходимо назвать идею *универсальных алгоритмов оптимального управления*. Эта идея была сформирована и развита в работах чл.- корр. АН СССР, проф. А.А. Красовского и его сотрудников. Универсальные алгоритмы оптимального управления А.А. Красовского формально получены в рамках теории *аналитического конструирования оптимальных регуляторов* с использованием *критерия (функционала) обобщенной работы* и *теоремы разделения*. В соответствии теоремой разделения при использовании достаточных вычислительных средств становится практически возможным синтез информационной и управляющей части (оптимального регулятора) *раздельно*, причем последняя часть синтезируется в детерминистской постановке. Система, оптимальная по критерию обобщенной работы, состоит из фильтра Калмана, осуществляющего текущую оценку вектора состояния в случайной среде функционирования системы, и оптимального регулятора, использующего *текущие оценки* вектора состояния и *текущие оценки параметров* математической модели объекта управления. *Идентификационный* подход к синтезу оптимальных адаптивных систем, развитый в конце 60-х – начале 70-х годов в работах Красовского А.А., бесспорно, стал одним из значительных результатов в теории адаптивного управления, хотя сама концепция адаптации к изменяющимся условиям функционирования объекта на основе текущего уточнения модели объекта была известна по ранее опубликованным работам.

Наряду с развитием теории адаптивного управления на основе результатов текущей идентификации объекта и возмущений — этот подход получил впоследствии название *идентификационного*, в конце 60-х и в 70-е годы возникла концепция адаптации как *текущей численной оптимизации в пространстве параметров* (в более общем случае и в пространстве алгоритмов и структур) регулятора. Процедура идентификации в явном виде исключалась из алгоритмов адаптации. Настройка параметров регулятора осуществлялась из условия минимума (реже — максимума) некоторой критериальной функции, выбираемой так, чтобы ее минимуму (или максимуму) соответствовало требуемое состояние системы управления и объекта. Цель собственно адаптации одновременно является и целью управления объектом. Например, цель адаптации может

формулироваться как вычисление оценок коэффициентов “идеального” или эталонного регулятора, обеспечивающего требуемое поведение объекта, которое также может быть задано эталонной моделью. Проблема такого подхода, получившего название *прямого адаптивного управления*, заключается в формировании *обобщенной ошибки управления*, совокупно содержащей информацию *обо всех* неконтролируемых изменениях характеристик объекта и воздействиях внешней среды. Другая проблема состоит в необходимости гарантированной достижимости целевых условий — в первую очередь условий устойчивости всех траекторий системы при заданных начальных условиях в допустимой области параметров и состояния. Выдающийся вклад в теорию систем с алгоритмами прямого адаптивного управления внесли как зарубежные ученые (I.D. Landau, R.V. Monopoli, K.S. Narendra, B. Widrow и др.)\*, так и российские (В.А.Якубович, В.Н.Фомин, А.Л.Фрадков).

В настоящее время общепринятой можно считать концепцию адаптивного управления как управления в условиях *неполной информации* (априорной, текущей) о моделях объекта и учитываемых воздействиях внешней среды на систему. Рядом специалистов такая ситуация характеризуется термином “немоделируемая динамика”. Выделим следующие типы неопределенности математической модели объекта, поведение которого зависит от ряда неконтролируемых факторов, совокупность которых объединим в вектор  $\mathbf{c} \in \Omega_{\mathbf{c}}$ :

а) *параметрическая неопределенность*, означающая, что  $\mathbf{c}$  есть вектор неизвестных *квазистационарных* (т.е. почти постоянных или медленно изменяющихся по сравнению с процессами в системе) коэффициентов уравнений объекта;

б) *сигнальная неопределенность*, означающая, что  $\mathbf{c}$  есть неизмеряемая функция времени, т.е.  $\mathbf{c} = \mathbf{c}(t)$ ;

в) *функциональная неопределенность*, означающая, что вектор  $\mathbf{c}$  есть неизвестная функция переменных состояния объекта или измеряемых переменных входа — выхода объекта.

Адаптация систем управления под влиянием внешних причин, “учителя” системы, используется в достаточно простых, в частности, допускающих линеаризованное описание динамических системах, когда возможно аналитическое определение эталонной модели поведения управляемого объекта в

окрестности рабочей стационарной точки. Адаптивность как свойство в этом случае означает способность удерживать поведение реальной системы управления в каком-либо смысле близким к желаемому, как бы не изменялись неконтролируемым образом динамика объекта и воздействие внешней среды.

К настоящему времени основные теоретические, и в меньшей степени прикладные результаты получены для адаптивных систем этого направления, где ключевую роль играет задаваемая эталонная модель объекта или системы. Содержанием теории таких адаптивных систем с эталонной моделью и линейным объектом является синтез алгоритмов адаптации, анализ их свойств с учетом динамики процессов в системе, традиционные для теории управления задачи устойчивости, управляемости, достижимости, идентифицируемости, качества, грубости (как робастности), реализуемости. Структурный синтез адаптивных систем управления с эталонной моделью является в большей степени предметом классической “неадаптивной” теории управления.

Упомянутые в начале введения самонастраивающиеся системы (экстремальные, поисковые, беспойсковые или аналитические) реализуют или являются возможными реализациями в соответствии с названными подходами. Независимо от определения такого рода систем — разных у различных и многочисленных авторов работ — для всех общим является задание — в явном или неявном виде — *модели поведения*, например, *числом* — значением допустимой амплитуды автоколебаний или моделью в виде расширенной системы уравнений состояний, учитывающие уравнения возмущений. При этом неполнота информации состоит в параметрической недоопределенности уравнений модели, главным образом, текущей неполноты знаний о числовых значениях коэффициентов уравнений. Для управления объектами с параметрической неполнотой информации оказывается достаточным (при выполнении условий достижимости и реализуемости) *параметрической* настройки регулятора с фиксированной структурой его связей и алгоритма. Даже в случаях, когда все исходные элементы такой системы (объект, измерительная часть, регулятор в основном контуре) линейны, система в целом ведет себя как существенно нелинейная и это причина тех проблем, с которыми приходится сталкиваться при анализе свойств адаптивных систем управления.

Проиллюстрируем на примере идею адаптивного подхода в задаче синтеза системы управления с неизвестными текущими значениями параметров уравнений динамики линейного объекта.

Пример. Пусть объект описывается линейным разностным уравнением с изменяющимися в процессе функционирования параметрами:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= a_k x_k + b_k u_k + c_k v_k; \\ y_k &= dx_k. \end{aligned} \quad (6.1)$$

В уравнении (6.1)  $x_k$  — текущие значения регулируемой величины;  $y_k$  — измеряемый выход объекта;  $u_k$  — управляющее воздействие с выхода регулятора системы;  $v_k$  — контролируемое воздействие на процессы в объекте, например, измеряемое возмущение. Коэффициенты  $a_k, b_k, c_k$  зависят от изменяющихся со временем условий функционирования системы и в обычных, не адаптивных системах, предполагаются известными или, по крайней мере, мало изменяющимися относительно известных расчетных значений  $a^*, b^*, c^*$ . Если целью управления таким объектом является стабилизация заданного расчетного значения выхода объекта  $y(t_k) = y^* = \text{const}$ , начиная с момента времени  $t_k = (k+1) \cdot \Delta t = t_* \geq 0$ , где  $\Delta t$  — период дискретизации, то “идеальный” закон регулирования для достижения этой цели имеет вид:

$$u_k^* = (b^*)^{-1} (x_{k+1}^* - a^* x_k - c^* v_k) = (b^* d^*)^{-1} (y^* - a^* y_k - c^* d^* v_k). \quad (6.2)$$

При подстановке (6.2) в уравнение объекта (6.1) следует, что с момента времени  $t = (k+1) \cdot \Delta t$  измеряемый выход  $y_{k+1} = y^*$ . Нетрудно увидеть, что “идеальный” закон регулирования (6.2) эквивалентен введению в контур стабилизации производной по времени от регулируемой величины и для его реализации требуется *полная текущая информация* обо всех переменных и параметрах уравнения объекта (1).

Теперь покажем, как можно решить ту же задачу управления в тех случаях, когда коэффициенты  $a, b, c$  в “идеальном” законе неизвестны и изменяются со временем *неконтролируемым* образом. Для этого воспользуемся уравнением “идеального” закона и допустим, что параметры  $a, b, c$  изменяются в ограниченной области: все возможные их значения принадлежат множеству  $\Omega(a, b, c)$ . Итак, “реальный” закон регулирования будет иметь следующий вид:

$$u_k = \theta_{1k} y^* + \theta_{2k} y_k + \theta_{3k} v_k, \quad (6.3)$$

где  $\theta_{ik}$  — настраиваемые (вычисляемые) коэффициенты. Очевидно, что правые части законов (6.2) и (6.3) совпадут, когда  $\theta_{1k} = (bc)^{-1}$ ;  $\theta_{2k} = -a(bc)^{-1}$ ;  $\theta_{3k} = -db^{-1}$ . Так как целью управления объектом (6.1) служит достижение равенства  $y_{k+1} = y^*$  для  $k \rightarrow \infty$ , то для промежуточных вычислений введем оценочную функцию

$Q(\sigma_{k+1})$ , где ошибка  $\sigma_{k+1} = y_{k+1} - y^*$  обусловлена несоответствием коэффициентов  $\theta_{ik}$  текущим значениям  $a, b, c$ . Поэтому теперь целью управления при *выбранном* законе (3) полагаем вычисление таких коэффициентов  $\theta_{ik}$ , при которых оценочная функция  $Q(\sigma_{k+1})$  достигает минимума:  $Q(\sigma_{k+1}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ . Реально для конечного значения  $k \leq k^*$  должна быть достигнута цель в виде неравенства

$$\lim_{k \rightarrow \infty} Q(\sigma_{k+1}) \leq \Delta, \quad \Delta > 0. \quad (6.4)$$

Выполнение поставленной цели  $Q(\sigma_{k+1}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$  или в виде целевого неравенства (6.4) эквивалентно решению первоначальной задачи синтеза “идеального” закона регулирования при известных коэффициентах  $a, b, c$ . Разница состоит в том, что в первом случае — при полной информации о математической модели объекта — решение следует как результат *конечного числа точных вычислений*; во втором случае решение осуществляется в результате *множества промежуточных вычислений* и достигается лишь в асимптотике, но при этом не требуется точная информация о текущих значениях коэффициентов  $a, b, c$ .

Для вычисления *оценок* неизвестных коэффициентов  $\theta_{ik}$  используем метод градиентного спуска для нахождения минимума оценочной функции  $Q(\sigma_{k+1})$ . Введем вектор оценок  $\hat{\theta} = \text{col}(\hat{\theta}_{1k}, \hat{\theta}_{2k}, \hat{\theta}_{3k})$ , где  $\hat{\theta}_{ik}$  — оценки неизвестных коэффициентов  $\theta_{ik}$  в реальном законе управления (6.3). Для использования метода градиентного спуска необходимо, чтобы оценочная функция *явно* зависела от вычисляемых оценок  $\hat{\theta}_{ik}$ . Поэтому в ошибку оценивания  $\sigma_{k+1} = y_{k+1} - y^*$  подставляем из уравнения объекта (6.1) значение измеряемой и регулируемой величины  $y_{k+1}$ , а оценочную функцию выбираем в классе квадратичных функций:

$$Q(\sigma_{k+1}) = 0,5 \sigma_{k+1}^2 = 0,5 (y_{k+1} - y^*)^2 = 0,5 [dax_k + dv_k + db(\theta_{1k}y^* + \theta_{2k}y_k + \theta_{3k}v_k) - y^*]^2.$$

Искомые оценки в соответствии с методом градиентного спуска вычисляются по алгоритму:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - \gamma \nabla_{\hat{\theta}} Q(\sigma_{k+1}) = \hat{\theta}_k - \gamma \sigma_{k+1} (\partial \sigma_{k+1} / \partial \theta_k), \quad (6.5)$$

где шаг “спуска”  $\gamma > 0$ ; значение оценки  $\hat{\theta}_0$  в начальный момент вычислений ( $k = 0$ ) задается из априорных соображений. Векторный алгоритм (6.5) состоит из трех скалярных алгоритмов вычисления оценок  $\hat{\theta}_{ik}$ . Так, например, алгоритм

вычисления оценки  $\hat{\theta}_{2k}$  из (5) записывается следующим образом:

$$\hat{\theta}_{2k+1} = \hat{\theta}_{2k} - \bar{\gamma} \nabla_{\hat{\theta}} Q(\sigma_{k+1}) = \hat{\theta}_{2k} - \bar{\gamma} b d (y_{k+1} - y^*) y_{k+1}. \quad (6.6)$$

Коэффициент  $b > 0$  — коэффициент передачи объекта в общем случае точно не известен и изменяется в процессе функционирования системы; коэффициент передачи  $d$  измерительной части системы управления известен. Их произведение в общем случае не изменяет своего знака и  $bd > 0$ , но его текущее значение неизвестно. Поэтому включим параметр  $bd > 0$  в настраиваемый из условия сходимости шаг алгоритма  $\gamma = \bar{\gamma}bd$ . Тогда вычислительный алгоритм (6) примет вид:

$$\hat{\theta}_{2k+1} = \hat{\theta}_{2k} - \gamma (y_{k+1} - y^*) y_{k+1} = \hat{\theta}_{2k} - \gamma \sigma_{k+1} y_{k+1},$$

где  $\gamma > 0$ ;  $\hat{\theta}_{20}$  — заданное начальное значение оценки. Теперь подведем характерные особенности приведенного решения задачи управления при неполной информации о математической модели объекта.

Во-первых, исходная задача управления — синтез “идеального” закона регулирования — *переформулируется* в задачу численной оптимизации введенного целевого функционала  $Q(\sigma_{k+1})$ , где аргументом служит ошибка  $\sigma_{k+1} = y_{k+1} - y^*$ . Однако в результате оптимизации функционала  $Q(\sigma_{k+1})$  цель управления — стабилизация измеряемой переменной  $y_k$  на заданном уровне  $y^* = \text{const}$  — выполняется. Необходимым условием этого является задание уравнения реального регулятора с настраиваемыми коэффициентами — оценками коэффициентов “идеального” закона.

Во-вторых, замкнутый контур — объект регулирования, измерительная система и регулятор — может рассматриваться как новый, *настраиваемый* объект, с внешним по отношению к нему параметрическим управлением, формируемым в соответствии с рекуррентным алгоритмом (6.5). Таким образом, в целом синтезированная адаптивная система имеет *двухуровневую* структуру. На первом уровне — в основном контуре — настраиваемом объекте — формируется сигнальное управление  $u_k(\hat{\theta})$ . На втором уровне — в *блоке адаптации* — вырабатывается внешнее параметрическое управление  $\hat{\theta} = \theta(\sigma_k)$ , формируемое в результате рекуррентных вычислений, где используются текущие значения измеряемых переменных  $y_k$  и  $v_k$ .

В исходно линейных, точнее квазилинейных или слабо неравновесных системах адаптивное управление направлено на достижение требуемой технологической



цели при неполной информации об объекте и внешней среде его функционирования, если задана некоторая эталонная модель поведения системы. Неполнота априорной и текущей информации в общем случае относится: 1) к структуре причинно – следственных связей в виде структурной схемы или графа множества входных независимых переменных и множества зависимых или регулируемых выходных; 2) к уравнениям связей – алгоритмам, операторам связей; 3) к параметрам уравнений связи, например, к коэффициентам дифференциальных уравнений.

В широком содержательном смысле будем определять адаптивность как целенаправленную приспособляемость, самоорганизацию или гомеостазис (технический, информационный, биологический и т.д.) в изменяющихся неконтролируемым образом условиях функционирования динамических, термодинамических, информационных и т.п. систем.

В ряде случаев после необходимых интеллектуальных и материальных затрат априорная неполнота информации с течением времени может быть преодолена и тогда необходимость в реализации адаптивности объективно не возникает. Но, как правило, сохраняется текущая неопределенность математической модели. В зависимости от уровня неполноты информации о математической модели объекта и среды его функционирования, т.е. о расширенной математической модели, адаптация осуществляется на уровнях *самоорганизации, самоалгоритмизации и самонастройки*, и реализуется соответственно в классах *самоорганизующихся систем, самоалгоритмизирующихся систем* и уже упомянутых ранее *самонастраивающихся систем*. Рассматриваемые в учебном пособии задачи касаются преимущественно класса самонастраивающихся систем управления техническими объектами.

Как отмечается, “в современной теории управления адаптивные и самоорганизующиеся системы по числу научных публикаций неизменно занимают первое или второе место среди всех направлений. ...Виден неослабевающий поток публикаций по адаптивным и самоорганизующимся системам в течение 50-летнего периода (эпохи) развития современной теории управления. С учетом неполноты статистики можно утверждать, что число научных теоретических статей и монографий этого направления превысило десять тысяч”.

Этот устойчивый интерес к проблеме адаптации в целом любопытен тем более, что практические результаты (например, производство адаптивных регуляторов

для промышленных нужд) гораздо скромнее и ограничивается небольшим числом серийно выпускаемых адаптивных контроллеров некоторыми ведущими мировыми фирмами, упомянутыми в предисловии. Анализ сложившейся ситуации дает в упомянутой книге акад. А.А.Красовский.

#### б..2. Задачи и методы синтеза систем адаптивного управления

В разделе рассматриваются подходы к решению задачи управления сложными динамическими объектами в условиях неполноты априорной и текущей информации об их математических моделях. Приводится содержательная и формальная постановки задачи синтеза систем адаптивного управления параметрически недоопределенным объектом и содержание этапов синтеза двухуровневых адаптивных систем идентификационного типа и систем с алгоритмами прямого адаптивного управления с использованием текущей измерительной информации.

Традиционные принципы проектирования систем управления на основе методов теории чувствительности и инвариантности (об этом см., например, в [27]) позволяют строить неадаптивные многоконтурные системы с компенсацией нежелательного и неконтролируемого влияния возмущений на управляемые процессы. Малочувствительные к сигнальным и параметрическим возмущениям “обычные” системы могут быть отнесены к адаптивным. Подобная точка зрения на свойства обычных систем с корректирующими обратными связями высказывалась давно и разными авторами, а сами системы назывались системами с *пассивной адаптацией*. Примеры таких систем описываются, например, в книгах [2, 20, 40]. Однако “адаптация” или “приспособляемость” в системах с пассивной адаптацией сохраняется в довольно ограниченных пределах в каждом конкретном случае.

“Активная” адаптивность также приводит к необходимости вводить корректирующие связи, но реализуются они в виде параметрических или координатно-параметрических вычислительных схем, что неизбежно приводит к нелинейности адаптивных систем, но при этом адаптивные свойства достигаются во всем допустимом диапазоне изменения неконтролируемых возмущений в отличие от систем с пассивной адаптацией. Существенно более сложный механизм функционирования адаптивных систем и порожаемые этим проблемы их проектирования есть та цена, которую приходится платить за полезные свойства таких систем. В монографии Дж. Саридиса отмечается в связи с этим, что “в любом из разделов техники никакая новая область не может



динамические параметры которого могут непредсказуемо изменяться, и корректирующее звено КУ, вырабатывающее управляющее воздействие  $u_c(t)$  в виде изменения параметров устройства управления или введения дополнительного воздействия  $u(t)$  в цепь основного контура.

Корректирующее устройство состоит из следующих функциональных элементов:

- анализаторов внешних и внутренних 1 и 2, определяющих текущие характеристики внешних воздействий  $f_0(t)$  и изменяемой части системы, и вычислителей 3 и 4. Первый вычислитель решает задачу первичной оптимизации, второй – вырабатывает управляющее воздействие в контуре самонастройки.

Работа КУ происходит следующим образом. Вычислитель 3 по выбранному критерию эффективности, заданным ограничениям и информации, поступающей от анализаторов 1 и 2, определяет оптимальные динамические характеристики системы и выбранные параметры управления. Оптимальные значения параметров сравниваются с текущими значениями, которые выдает анализатор 2. Получаемые при этом сигналы рассогласования поступают в вычислитель 4, который создает управляющий сигнал, воздействующий на УУ, стремясь изменить динамические характеристики основного контура так, чтобы они незначительно отличались от оптимальных параметров. Так выполняется так называемая вторичная оптимизация. Если действительные характеристики не отличаются от оптимальных параметров, сигналы рассогласования равны нулю, и контролируемые изменения в системе не производятся.

Некоторые СНС используют информацию только о внешних воздействиях (рис.6.2).

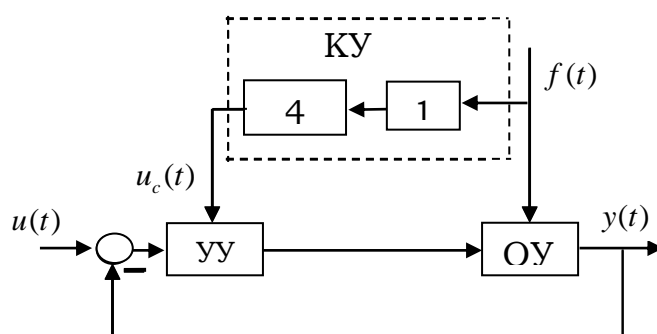


Рис. 6.2

В процессе работы под влиянием внешних воздействий свойства объекта изменяются. Корректирующее устройство КУ воспринимает информацию о возмущении на объект управления ОУ и вырабатывает воздействие  $u_c(t)$  для коррекции алгоритма управления устройства УУ.

Такие системы применяются в некоторых автопилотах для учета таких внешних воздействий, как температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра и др.

На рис.6.3 показана СНС по динамическим характеристикам объекта.

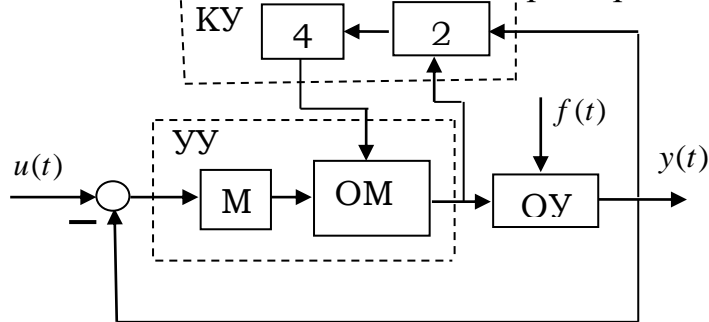
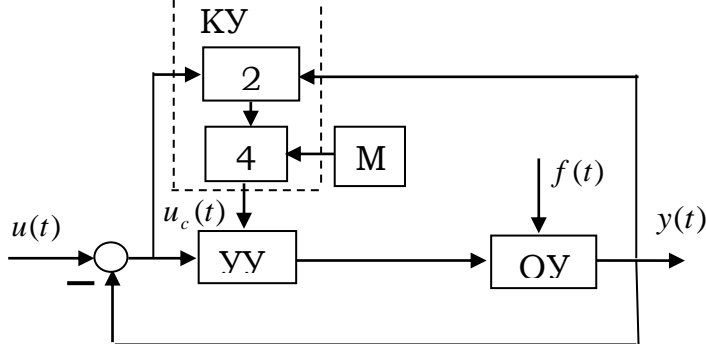


Рис. 6.3

В рассматриваемой системе управляющее устройство УУ состоит из звена желаемой модели М прямой цепи и обратной модели объекта управления ОМ. По информации, получаемой от анализатора 2, об объекте управления вычислитель 4 вводит в модель ОМ обратную передаточную функцию объекта управления. Таким образом, СНС стабилизирует желаемые динамические свойства системы. Однако ошибки, могущие возникнуть в контуре самонастройки, не компенсируются по обратной связи. Поэтому такая СНС относится к классу разомкнутых.

На рис.6.4 показана функциональная схема СНС, работающей по замкнутому циклу.



В данной схеме анализатор 2 вырабатывает информацию о текущей модели основного контура и подает её на вычислитель 4, где сравнивается с желаемой моделью, поставляемой блоком модели М. Таким образом сигнал

самонастройки  $u_c(t)$  есть результат замкнутой системы.

Существует еще один способ стабилизации динамических характеристик системы. Речь идет о системе с глубокой отрицательной обратной связью. Структурная схема для такого случая показана на рис. 6.5.

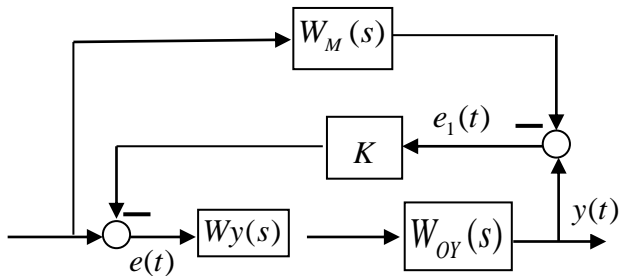


Рис. 6.5

В схеме рис.6.5  $W_M(s)$  - желаемая передаточная функция системы.  $K$ - коэффициент глубокой обратной связи. Можно показать, что при  $K \rightarrow \infty$ , имеет место  $W(s) = W_M(s)$ .

В реальных условиях  $K$  ограничен условиями устойчивости системы, и равенство передаточных функций выполняется приближенно.

#### 6.4. Самоорганизующиеся системы

По своей структуре самоорганизующаяся система представляет совокупность элементов, связанных случайным образом.

В дальнейшем, при внешних возмущениях в них образуются устойчивые связи подобно тому, как в природе происходит приспособление живых организмов к различным внешним условиям.

Классическим примером технического устройства, имитирующего адаптационные свойства живых организмов, служит гомеостат Эшби (схема, рис. 6.6.).

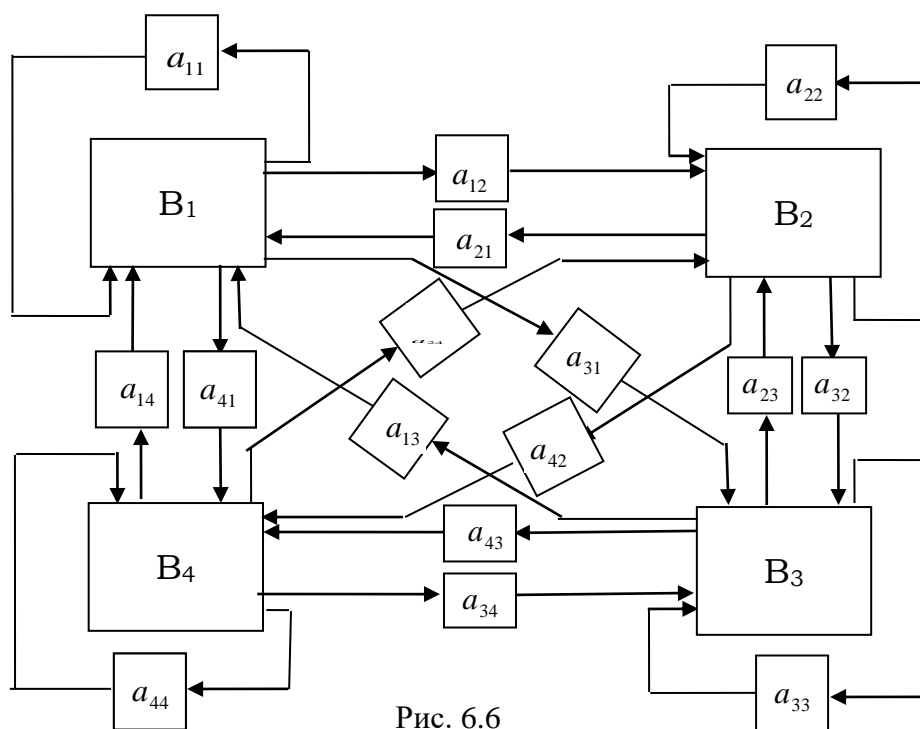


Рис. 6.6

Он представляет собой ансамбль четырех блоков  $B_1$ - $B_4$ , каждый из которых содержит подвижной электромагнит, поворачивающийся под действием токов, протекающих по его четырем обмоткам. Угол поворота каждого электромагнита от некоторого нулевого положения является выходной координатой  $z_i$  соответствующего блока. На магнитах закреплены стрелки, которые одновременно являются движками потенциометров, что позволяет преобразовывать механические перемещения магнитов в электрический сигнал. Каждый из полученных сигналов передается на обмотки остальных трех магнитов через потенциометры с коэффициентами передачи  $a_{ij}$  так, что передаваемый сигнал может изменяться по величине и по знаку. Каждый блок, кроме того, имеет свою собственную обратную связь, коэффициент передачи которой может меняться по величине и по знаку.

Таким образом, гомеостат характеризуется наличием всех возможных связей. Поведение такой системы можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + a_{13}z_3 + a_{14}z_4; \\ \dot{z}_2 &= a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + a_{23}z_3 + a_{24}z_4; \\ \dot{z}_3 &= a_{31}z_1 + a_{32}z_2 + a_{33}z_3 + a_{34}z_4; \\ \dot{z}_4 &= a_{41}z_1 + a_{42}z_2 + a_{43}z_3 + a_{44}z_4; \end{aligned}$$

В этой системе коэффициенты  $a_{ij}$  определяют долю выходного сигнала  $j$ -го

блока, передаваемого на вход  $i$  – го блока, причем  $|a_{ij}| \leq 1$ .

Цель работы гомеостата заключается в автоматическом поиске устойчивого состояния, т.е. такого положения подвижных электромагнитов, при котором ни одна из связанных стрелок не достигает крайнего положения. При нарушении устойчивости по какой-либо причине включается устройство управления, которое изменяет коэффициенты  $a_{ij}$  до тех пор, пока не будет найдена такая комбинация, при которой ни одна из подвижных систем не будет достигать своих крайних положений.

Гомеостату Эшби присущи принципиальные особенности, которые отличают его от других систем. Это его избыточность структуры, достигаемая за счет того, что каждый из настраиваемых коэффициентов  $a_{ij}$  может принимать множество значений. Общее количество всех возможных комбинаций коэффициентов достигает 400000.

Исследования гомеостатических систем, проведенные Эшби, позволили ему сформулировать закон необходимого разнообразия, согласно которому разнообразие состояний управляющей системы должно быть не меньше разнообразия состояний объекта управления.

Другой особенностью гомеостата Эшби является его статистический характер поиска устойчивого состояния. Статистический поиск означает важнейшее свойство – способность целенаправленно добиваться нужного результата при отсутствии информации о свойствах системы и условиях ее работы.

Гомеостатические системы были применены для автоматизации процессов проектирования автоматических систем управления. Задача определения передаточных функций стабилизирующих и корректирующих звеньев может быть решена компьютерным методом с помощью гомеостатической системы, автоматически подбирающей параметры этих звеньев в соответствии с поставленными требованиями.